MODELIZACIÓN GEOESTADÍSTICA DE UN YACIMIENTO DE ORO DEL DISTRITO MINERO LA JOYA (ORURO- BOLIVIA)

C. Grijalva[1]; P. Carrión[2]

1 Ingeniero en Minas, Escuela Superior Politécnica del Litoral (2004); Diplomado, Universidad Técnica de Oruro (2002). FICT-ESPOL
2 Ingeniero en Geología, Escuela Superior Politécnica del Litoral (1991); Doctor Ingeniero, Universidad Politécnica de Madrid (1996); Profesor ESPOL desde 1996. FICT-ESPOL.

RESUMEN

El presente trabajo muestra todos los aspectos que forman parte de la evaluación de un yacimiento, haciendo uso de la metodología geoestadística. Para ello, se ha tomado un caso práctico, donde se ilustra en forma detallada el proceso de evaluación de un yacimiento de oro.

Cabe indicar, que los datos de esta investigación, son provenientes de un yacimiento del Distrito Minero La Joya (Oruro – Bolivia), Distrito Minero, conocido a nivel mundial por su importante producción de oro, siendo el yacimiento más representativo el denominado Kori Kollo.

PALABRAS CLAVES: Modelización Geoestadística, análisis exploratorio, análisis variográfico, efecto pepita, anisotropía, estimación por kriging.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del oro, parte del recurso natural, conlleva una actividad minera con varias operaciones unitarias. Esto implica que, se necesita una inversión para realizar la operación, la cual, dependiendo del tamaño del proyecto, puede ser una gran cantidad de dinero. Todo análisis económico se basa en el ingreso que se tendrá, que para este caso sería el contenido de mineral útil que será extraído a lo largo del tiempo. Es pues, la evaluación del yacimiento, una investigación sobre la cual se apoyará toda decisión económica, motivo por el cual, se ha desarrollado el método geoestadístico con el fin de conocer, no solo una estimación del contenido sino también una medida de la incertidumbre (error) asociada a esa estimación.

OBJETIVO

El objetivo principal es definir: ¿Cuánto?, ¿Dónde? y ¿Cómo? están distribuidos los valores del mineral útil dentro de la mineralización, con límites de confianza que permitan tomar decisiones técnicas que tendrán una connotación económica.

METODOLOGÍA

Antes de una investigación se requiere un cronograma de objetivos a cumplirse que para este caso se han subdividido en dos fases y se ilustran a continuación:

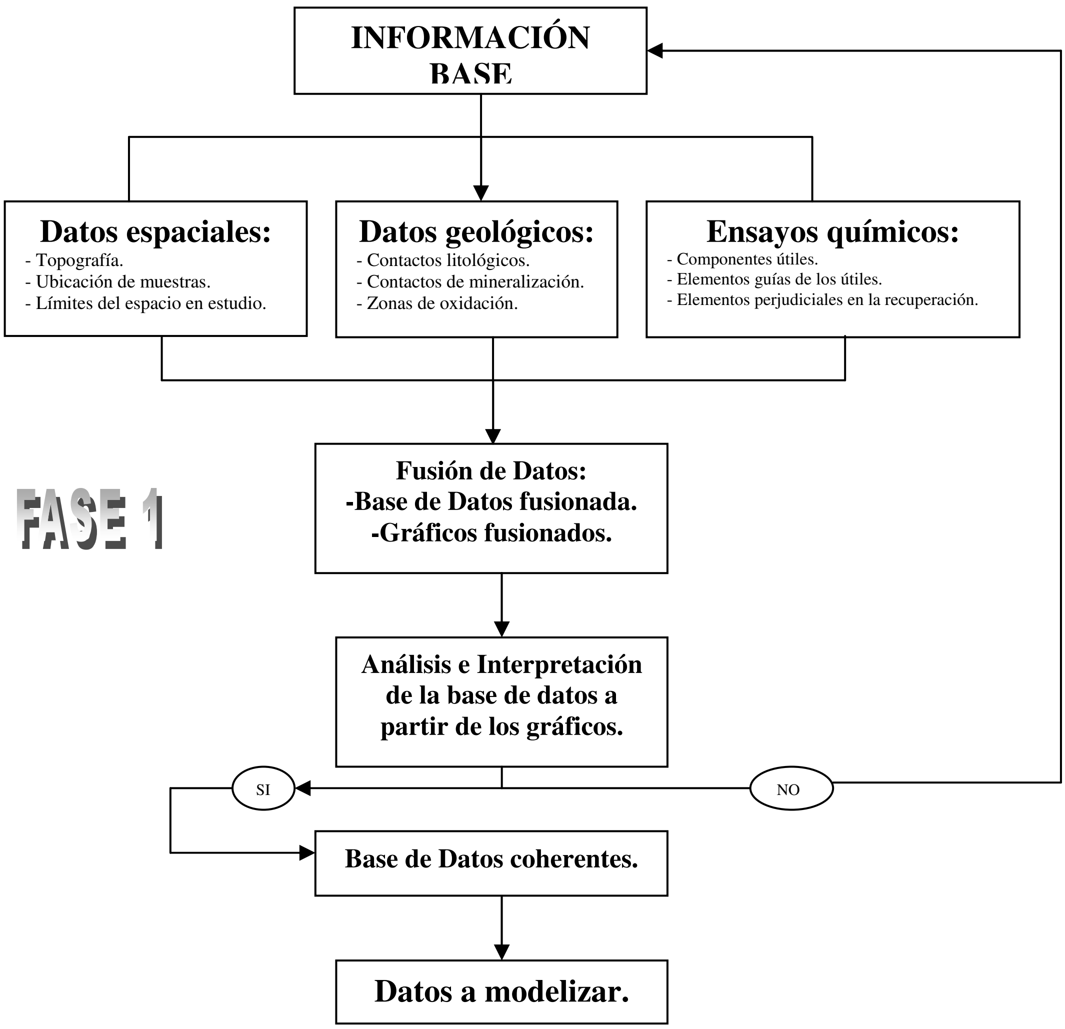


Fig. 1. Fase 1: Información Base. Información requerida para una base de datos a modelizar.

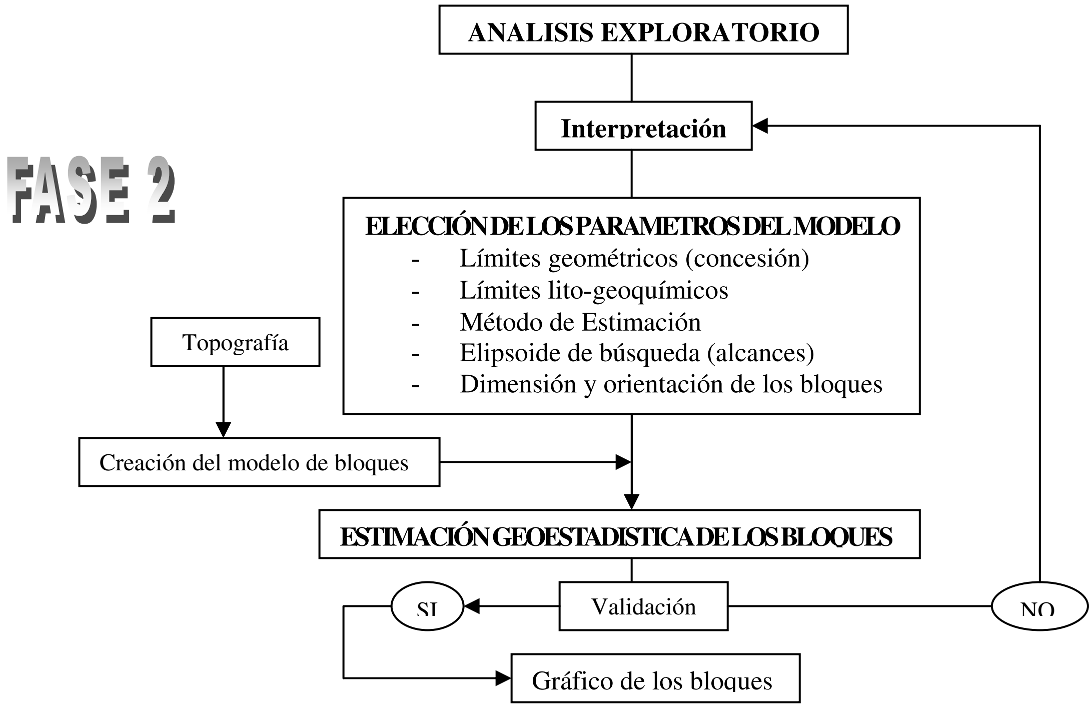


Fig. 2*.* Fase 2: Modelización Geoestadística. Pasos para la modelización.
(Pérez Suárez, 1997).

<u>MODELIZACIÓN GEOESTADÍSTICA</u>

1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS.

1.1. Presentación de los datos.

Los datos que se poseen son muestras, o testigos, ubicadas a lo largo de los sondajes cada 1 – 1.5m. Se ha tomado la medida del contenido de oro (Au) en todos y cada uno de los intervalos muestreados.

Se compositarán en intervalos de 5 m de longitud, que es la altura del banco con el que explotan los tajos, y la ley de cada compósito será la ponderación lineal de las muestras involucradas.

1.2. Estadística Clásica.

- **Histograma de Frecuencias.**

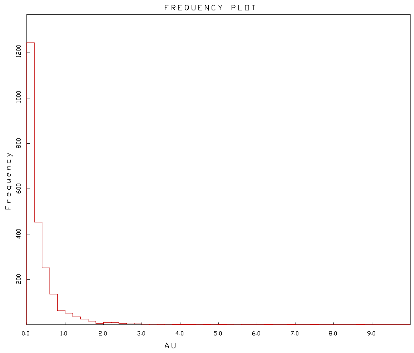
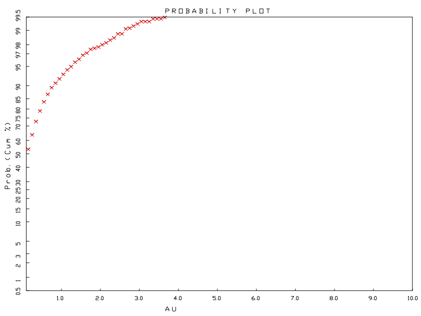


Fig. 3. Histograma de la variable Au (g/t).

- **Probabilidad Acumulada (normal y log-normal).**



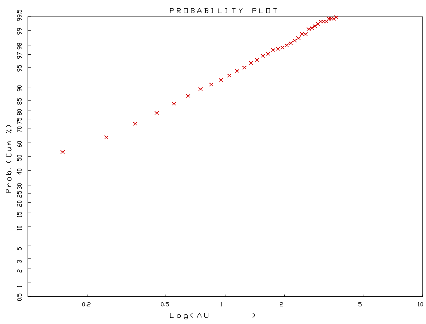


Fig. 4. Probabilidad acumulada normal.

Fig. 5. Probabilidad acumulada log normal.

- **Estadística Descriptiva.**

AU (g/t)	
Media	**0.37**
Error típico	**0.01**
Mediana	**0.17**
Moda	**0.04**
Desviación estándar	**0.62**
Varianza de la muestra	**0.39**
Curtosis	**60.65**
Coeficiente de asimetría	**6.16**
Rango	**9.74**
Mínimo	**0.00**
Máximo	**9.74**
Suma	**861.64**
Cuenta	2334

Tabla 1. Resumen estadístico de la variable Au.

2. ANÁLISIS VARIOGRÁFICO (ESTRUCTURAL).

2.1. Cálculo de los variogramas experimentales.

Los diferentes variogramas serán calculados en direcciones, azimut como buzamiento, de tal manera que se abarque todo el espacio geográfico, es decir, en las tres dimensiones.

Se tomará los variogramas en las direcciones 0º/0º, 90º/0º y 0º/90º (vertical) y se muestran a continuación:

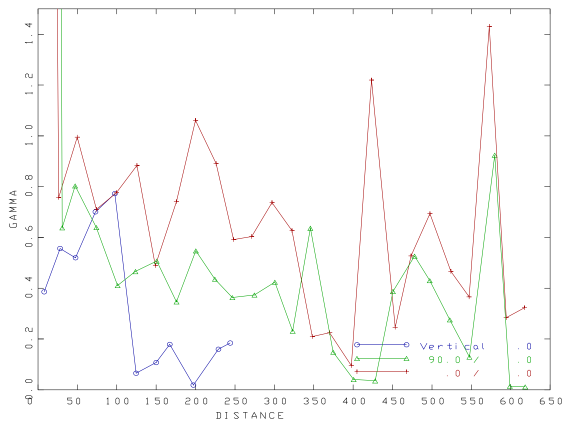


Fig. 6. Variogramas de Au en las diferentes direcciones.

2.2. Identificación de anisotropías.

Para visualizar, la existencia o no, de mejor manera la anisotropía se hace uso de mapas variográfico que son representaciones bidimensionales de los valores del variograma experimental. Se presentarán mapas variográficos de las secciones principales, planta, transversal y longitudinal, para el logaritmo de Au pues estos ilustran mejor las direcciones de anisotropía.

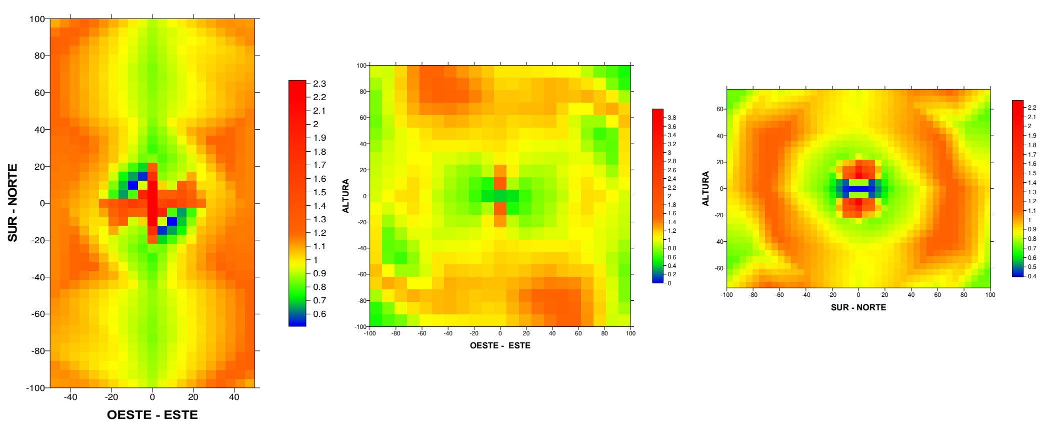


Fig. 7. Mapas Variográficos del logaritmo de Au en las secciones planta, transversal y longitudinal respectivamente.

Los mapas variográficos nos indican que las direcciones principales de anisotropía son: 0º/0º, 90º/0º y 0º/90º (vertical).

2.3. Ajuste a posibles modelos teóricos.

Se muestran los variogramas y los modelos teóricos a los que mejor se ajustan en las direcciones principales de anisotropía para Au y para el logaritmo de Au.

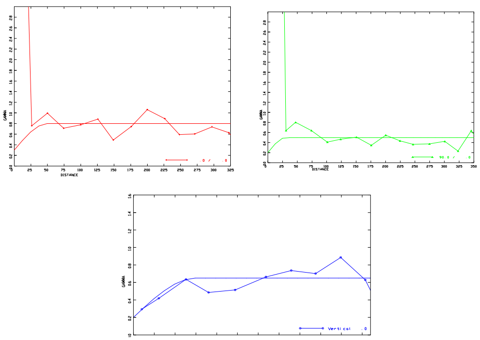


Fig. 8. Variogramas y modelos teóricos para Au

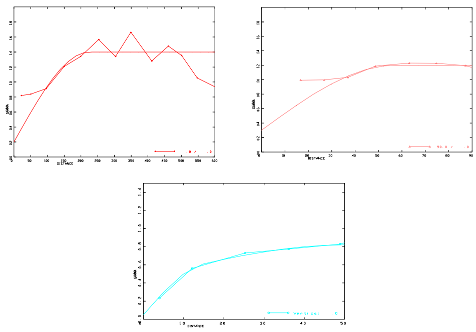


Fig. 9. Variogramas y modelos teóricos para logaritmo de Au

2.4. Test de calidad de los modelos teóricos: validación cruzada.

Una de las maneras de evaluar si los modelos escogidos representan correctamente a las variables en estudio es la validación cruzada. Para este caso, se tomó como referencia el análisis de un sector de explotación próximo a este yacimiento. Del contraste de los valores reales de explotación vs valores estimados para este otro sector, se corroboró que los variogramas logarítmicos presentan resultados más precisos. Observando la ***Fig. 9***., se denota que, visualmente, el logaritmo de Au es el que mejor variograma que se ajusta los modelos teóricos.

3. ESTIMACION POR KRIGING DE BLOQUES.

3.1. Construcción del modelo geológico de bloques.

- **Forma y Tamaño de los Bloques.**

Para elaborar el tamaño y forma se consideró los siguientes parámetros: direcciones y alcances de anisotropía, distribución de los sondeos y unidades de explotación.

Se tiene un bloque de 25m x 10m x 5m como se muestra en la ***Fig. 10***:

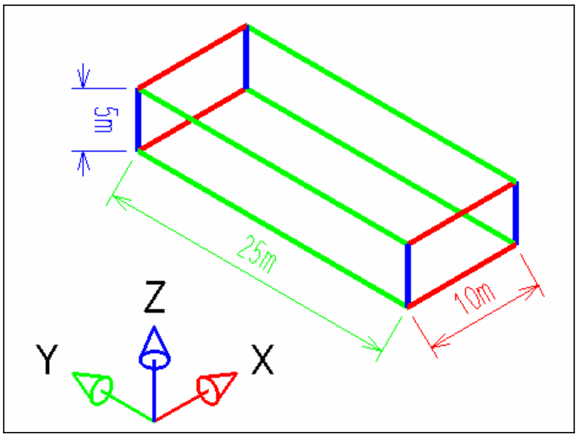


Fig. 10. Forma y tamaño de los bloques a estimar.

3.2. Elipsoide de Búsqueda.

Radio mayor (norte)	50 m
Radio medio (este)	15 m
Radio menor (elevación)	12.5 m
# Sectores	8
# min. de muestras	2 por total
# max. de muestras	3 por sector

Tabla 2. Elipsoide de búsqueda.

3.3. Resultados de la Estimación.

Se ha separado las reservas según se emplacen en la zona de oxidación o la zona de sulfuros. Esta separación se debe a que los procesos de tratamiento para los óxidos y sulfuros son diferentes y por ende tienen costos diferentes. Las siguientes tablas resumen los resultados para la zona de oxidos:

RANGOS	LEY Au (g/t)	LEY Ag (g/t)	LEY CNSCu (%)	TONELAJE (Ton)	ZONA	P.E.
0<Au≤0.4	0.15	2.16	0.003	6,831,014.69	OXIDOS	2.43
0.4<Au≤0.8	0.48	2.84	0.007	5,254,476.20	OXIDOS	2.43
0.8<Au≤1.2	0.89	3.94	0.010	1,056,149.40	OXIDOS	2.45
1.2<Au≤1.6	1.29	5.28	0.011	209,518.26	OXIDOS	2.45
Au>1.6	1.76	8.34	0.034	130,769.07	OXIDOS	2.45
TONELAJE OXIDOS				**13,481,927.62**		

Tabla 3. Resumen de reservas para la zona de óxidos.

3.4. Clasificación de reservas "in situ".

Existen varias clasificaciones de reservas que se podrían aplicar, pero se considerará un método propuesto por Annels (1991) quien establece diferentes categorías de reservas en base a la distribución de los valores de la varianza del kriging de los bloques estimados.

La ***Fig. 11*** ilustra el histograma de frecuencias de la varianza de estimación, además, se ha agregado una curva de frecuencia para visualizar mejor las diferentes poblaciones (componentes) que muestra la distribución de la varianza.

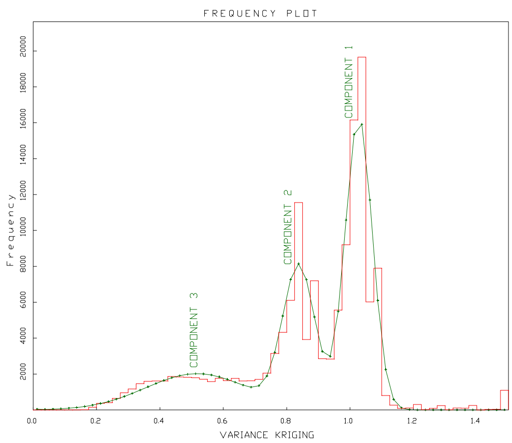


Fig. 11. Histograma y curva de frecuencia de la varianza de estimación por kriging mostrando las diferentes poblaciones (componentes).

Como se puede observar, existen 3 poblaciones (componentes) muy definidas y en base a esto se definen tres categorías lo cual quedaría:

VARIANZA	CATEGORIA	LEY Au (g/t)	TONELAJE (Ton)	%	ZONA
0 - 0.75	Probadas	0.99	9,904,270.28	73.46	OXIDOS
0.75 - 0.95	Probables	0.68	3,021,349.40	22.41	OXIDOS
> 0.95	Posibles	0.35	556,307.94	4.13	OXIDOS
TONELAJE OXIDOS			**13,481,927.62**	**100.00**	

Tabla 4. Clasificación de reservas para la zona de óxidos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis exploratorio de datos indica que los datos pertenecen a mineralizaciones vetiformes. La variable se ajusta a una distribución log – normal, donde la gran mayoría son valores bajos y con un efecto proporcional marcado debido al comportamiento muy asimétrico de los datos. Cabe acotar que en este caso de distribución asimétrica de datos, la media no representa la tendencia central de los mismos, para estas variables un estimador más apropiado para estimar la medida central es la media geométrica.

El análisis variográfico indicó una discontinuidad en el origen (efecto pepita) del Au, el comportamiento cercano al origen declara una alta variabilidad del Au por lo que los ajustes fueron a modelos esféricos. Se identificó una anisotropía del tipo zonal que no pudo ser regulada por ninguna transformada de la variable. Los variogramas experimentales normales no poseen un comportamiento muy definido, especialmente para las direcciones horizontales, motivo por el cual, se escogió los variogramas experimentales logarítmicos como la mejor opción. Esta opción logarítmica, como ya se indicó, se tomó como referencia del análisis de un sector de explotación próximo a este yacimiento, de por sí es la continuación de la mineralización, en donde los variogramas logarítmicos presentan resultados más precisos en la estimación.

Los resultados provenientes de la estimación por kriging reflejan una distribución que concuerda, de manera bastante aceptable, con la morfología de la mineralización. Es importante recalcar que esto se debe al análisis variográfico, el que es considerado como el corazón de estimación, pues es este quien transmite al kriging el comportamiento de la variable en todas las direcciones.

La varianza de estimación es tan importante como el estudio variográfico mismo, pues es un indicador de la confiabilidad de la estimación. Ningún otro método de estimación brinda una manera de medir la confianza. Como se observo el método de Annels (1991) para clasificar reservas pudo ser aplicado para este caso. La varianza de estimación más que un parámetro cuantitativo debe ser considerada como un parámetro cualitativo, que es indicativo de la incertidumbre en cada unidad de estimación.

A pesar de que la estimación geoestadística se presenta como el mejor método para estimar, no es recomendable descartar los métodos clásicos pues se los puede utiliza como comprobación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALFONSO ROCHE J., Geoestadística (Guayaquil, Ecuador, Apuntes de clases, 1999).

2. DATAMINE GUIDE (Santiago de Chile, Chile, Training Course for South America, 1996).

3. DAVID MICHEL, Geostatistical Ore Reserve Estimation (3era. Edición, Amsterdam, Holanda, Elsiever Scientific Publishing Company, 1977).

4. EMERY XAVIER, Geoestadística Lineal (1era. Edición, Santiago de Chile, Chile, Departamento de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, 2000.

5. ISAAKS E. Y MOHAN SRIVASTAVA R., Applied Geostatistics (New York, USA, Oxford University Press, 1989).

6. JOHNSON SCOTT Y SCHMIDT KIRK EDITORES, Ore Reserve Estimation for the Kori Kollo Gold – Silver Deposit (Oruro, Bolivia, Reporte Técnico, Battle Mountain Gold Company, Empresa Minera Inti Raymi S.A., noviembre 1990).

7. JOURNEL A.G. Y HUIJBREGTS C., Mining Geostatistics (New York, USA, Academic Press, 1978).

8. LÓPEZ JIMENO C. Y BUSTILLO REVUELTA M., Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras (Madrid, España, Entorno Grafico S.L., 1997).

9. MEDINACELLI R., Conceptos y Aplicaciones a Problemas de Estimación de Recursos y Reservas (Oruro, Bolivia, Apuntes de Clases, 2002).

10. PEÑAFIEL TORREZ M., ″Estimación de Reserva Minable y Diseño de Pit de la Parte de Óxidos de Nueva Esperanza Norte Depósito de Oro y Plata″ (Oruro, Bolivia, Tesis, Ingeniería de Minas, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, 1998).

11. RENDU J.M., An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation (Johannesburg, South African, Institute of Mining and Metallurgy, 1978).

12. ROYLE A.G., A practical Introduction to Geostatistics (Leeds, England, Department of Mining and Mineral Sciences, 1971, revised 1979).

13. VALLÉE MARCEL, Guide to the Evaluation of Gold Deposits (Québec, Canada, Canadian Institute of Mining, Metallurgy y Petroleum, 1996).